

地球の気候システム：現在の地球環境・エネルギー収支・温室効果

地球の気候システム（地表温度）の決定要因：

1. 地球軌道上での太陽放射量（年間日射量）
2. 地球の反射率（惑星アルベド）
3. 大気の温室効果（温室効果ガスの量：CO₂ 量）

[現在]

1. 太陽放射量：1370 W/m²

2. 惑星アルベド：0.3

地球の吸収するエネルギー（太陽放射の70%）と
地球の放射するエネルギー（地球放射）の均衡

・・・有効放射温度（Te）= -18℃

3. 温室効果：CO₂・・・0.03%（温室効果 = +33℃）

→ 平均地表気温 15℃，水が液体として存在

◆太陽放射（S: Solar Flux）

地球軌道上：1370 W/m²（人工衛星観測）

（単位時間・単位面積当たりのエネルギー量）

地球がうける太陽放射エネルギー量（毎分）

$$= S \times (\text{地球断面積}) \times 60 \text{秒} = 1.1 \times 10^{19} \text{ J / 分}$$

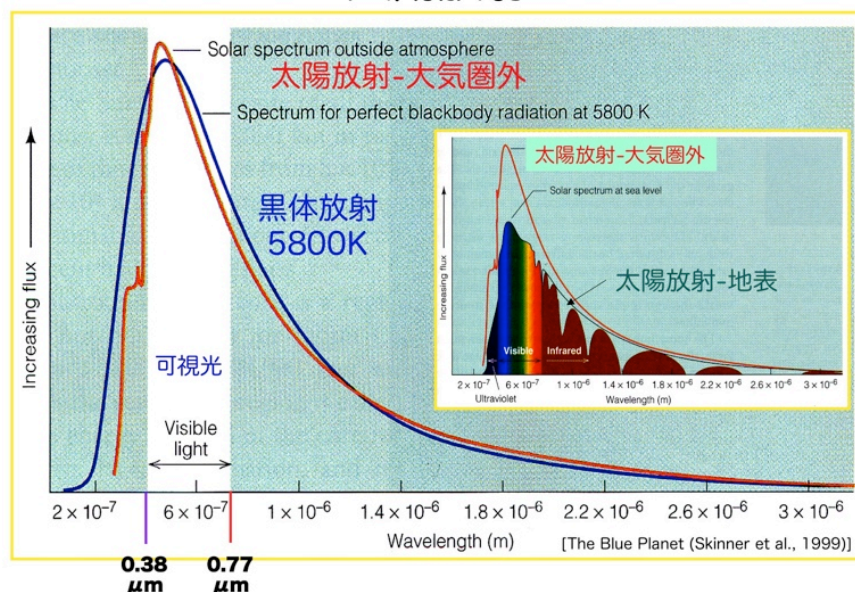
$$= \text{石炭燃焼 } 8 \times 10^{17} \text{ ton / 分}$$

（原発1基：100万kW = 1×10⁹J/s = 6×10¹⁰J/分・・・約2×10⁸基「2億基」）

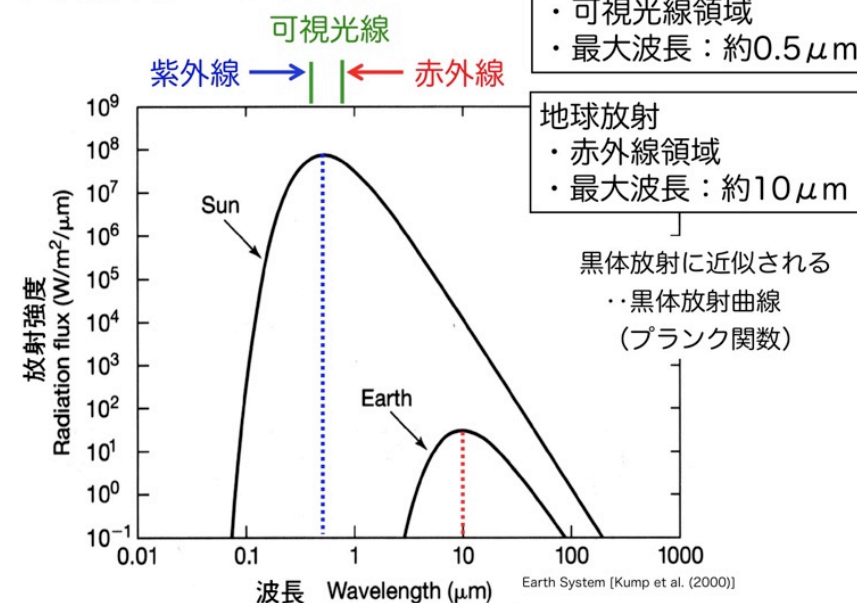
- ・火山 $1.87 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$
(3.0×10¹⁹ J/年・・・1年分=太陽放射の約1分間分)
- ・温泉/地熱 0.12×10^{-3}
- ・地震 $2.5 \sim 4.4 \times 10^{-5}$
- ・地殻熱流量 87×10^{-3}
(0.39×10¹⁹ J/日・・・3日分=太陽放射の約1分間分)

人間活動
エネルギー消費量
2×10²⁰ J/年
(鹿園, 1992)
= 5.5×10¹⁷ J/日
(20日分=太陽放射の約1分間分)

太陽放射

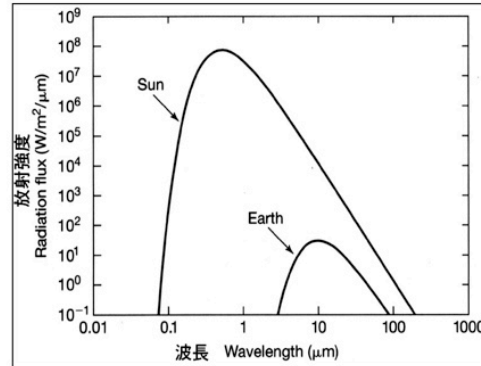


太陽放射・地球放射



「黒体放射」

- 1) ヴィーンの変位法則
最大波長 (μm)
= $2898 / \text{絶対温度(K)}$



- 2) ステファン-ボルツマンの法則
(Stefan-Boltzmann: シュテファン-ボルツマン)
放射エネルギー全量 [F] (W/m^2)
= $\sigma \cdot [\text{絶対温度(K)}]^4$

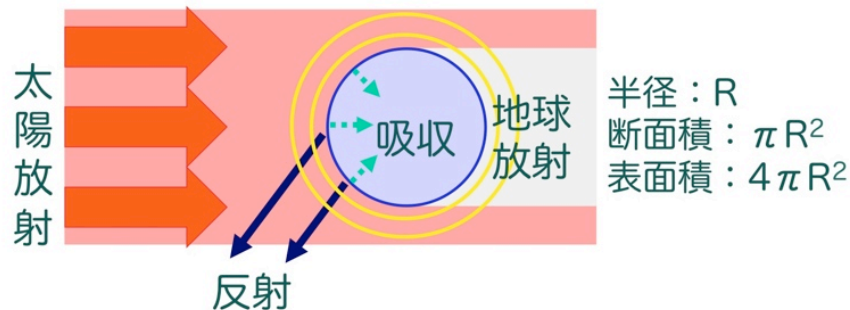
[ステファン-ボルツマン定数: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$]

地球の放出するエネルギー

$$E_{\text{em}} = [\text{表面積}] \times [\text{地球放射エネルギー}]$$

$$= 4\pi R^2 \times \sigma T_e^4 \quad (T_e: \text{地表の温度})$$

- 地球放射: 黒体放射
- ステファン-ボルツマンの法則

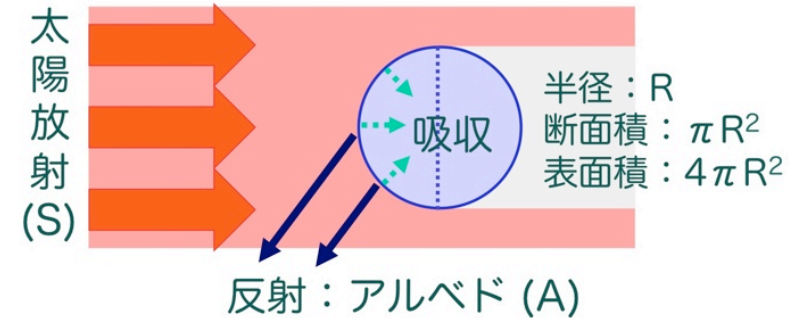


地球の吸収するエネルギー

$$= [\text{地球が受ける太陽放射エネルギー: } E_{\text{in}}]$$

$$- [\text{地球が反射する太陽放射エネルギー: } E_{\text{ref}}]$$

$$E_{\text{ab}} = E_{\text{in}} - E_{\text{ref}} = \pi R^2 S (1-A)$$



有効放射温度: T_e

$$T_e^4 = S(1-A) / 4\sigma$$

[地球] 太陽放射(S) = 1370 W/m^2
アルベド(A) = 0.3
 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$
 $\therefore T_e = 255 \text{ K} = -18^\circ\text{C}$

$$\text{平均地表温度 } T_s = 288 \text{ K} = 15^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = T_s - T_e = \Delta T_g = 33^\circ\text{C}$$

大気の温室効果

大気の組成

表 2.4 地表付近の大気組成
(小倉, 1984; Fegley, 1995 にもとづく)

成分	分子量	容積比(%)	重量比(%)	その他温室効果ガス	容積比(%)
窒素	N ₂	28.01	78.088	75.527	
酸素	O ₂	32.00	20.949	23.143	
アルゴン	Ar	39.94	0.93	1.282	
● 二酸化炭素	CO ₂	44.01	0.03	0.0456	
ネオン	Ne	20.18	1.8×10 ⁻³	1.25×10 ⁻³	
ヘリウム	He	4.00	5.24×10 ⁻⁴	7.24×10 ⁻⁵	
● メタン	CH ₄	16.05	1.4×10 ⁻⁴	7.25×10 ⁻⁵	
クリプトン	Kr	83.70	1.14×10 ⁻⁴	3.30×10 ⁻⁴	
水素	H ₂	2.02	5×10 ⁻⁵	3.48×10 ⁻⁶	
● 一酸化二窒素	N ₂ O	44.02	5×10 ⁻⁵	7.6×10 ⁻⁵	
一酸化炭素	CO	28.01	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	
キセノン	Xe	131.29	8.7×10 ⁻⁶	3.9×10 ⁻⁶	
● オゾン	O ₃	48.00	2×10 ⁻⁶	3×10 ⁻⁶	
塩化水素	HCl	36.46	1×10 ⁻⁷	1.3×10 ⁻⁷	
				水蒸気	H ₂ O
					1×10 ⁻⁵ - 4
				(南極) - (熱帯)	
				フロン (8μm-12μmに吸収域を持つ)	
				Freon-11	CCl ₃ F
					2.6×10 ⁻⁹
				Freon-12	CCl ₂ F ₂
					4.7×10 ⁻⁹
				* 二酸化炭素	CO ₂
					0.0368 (1999)

● : 温室効果ガス

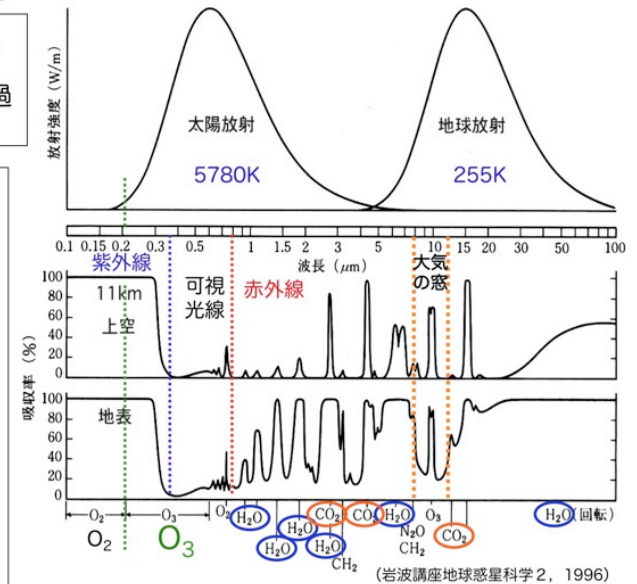
(岩波講座地球惑星科学 2, 1996)

大気の吸収特性

- ・紫外線・吸収 - O₃
 - ・可視光線・透過
 - ・赤外線・吸収・透過
- (H₂O, CO₂)

太陽放射
可視光線として地表
まで入射

地球放射
12μm <
H₂O により
ほぼ100%吸収
15μm
CO₂による吸収
8~12μm
大気の窓
→ Freon-11,
O₃が吸収



大気の吸収特性

◆紫外線の吸収

◎オゾンの形成

O₂ + 紫外線 → O + O : 光解離

O + O₂ + 気体分子 → O₃ + 気体分子

衝突 N₂, O₂ 衝突のエネルギー吸収
→ 速度を増す → 温度上昇

◎オゾンの分解 : O₃ + 紫外線 → O₂ + O

* 形成/分解の平衡 → オゾン層の濃度一定

◆赤外線の吸収

◎気体分子の回転 : H₂O - 波長10μm以上 (cf. 電子レンジ)

◎気体分子の曲げ振動 : H₂O - 波長6.3μm

CO₂ - 波長15μm

◎気体分子の非対称振動 : CO₂ - 波長4.3μm

地球の気候システム

★地表温度 : 15°C, 水が液体として存在

決定要因 :

1. 地球軌道上での太陽放射 (S : 1370 W/m²)

2. 地球の反射率 (アルベド : 0.3)

地球の吸収するエネルギー (太陽放射の70%) と
地球の放射するエネルギー (地球放射) の均衡

・・・有効放射温度 (Te) = -18°C

3. 大気の温室効果 (ΔTg = 33°C)

●温室効果ガス : CO₂, CH₄, N₂O, O₃, H₂O, ...

●大気の吸収特性

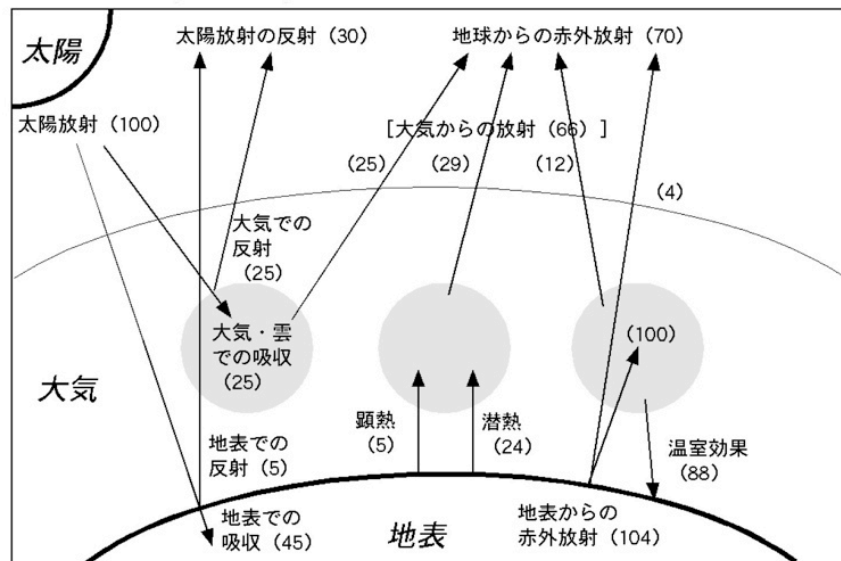
紫外線 : O₃により吸収, 可視光線 : 透過

赤外線 : H₂O, CO₂による吸収帯がある

●太陽放射 : 紫外線は吸収, 可視光として地表へ

地球放射 : 赤外線域一大気による吸収 → 温室効果

地球-大気系のエネルギー収支



Earth System [Kump et al. (2000)] [Schneider, 1987]

大気の構造

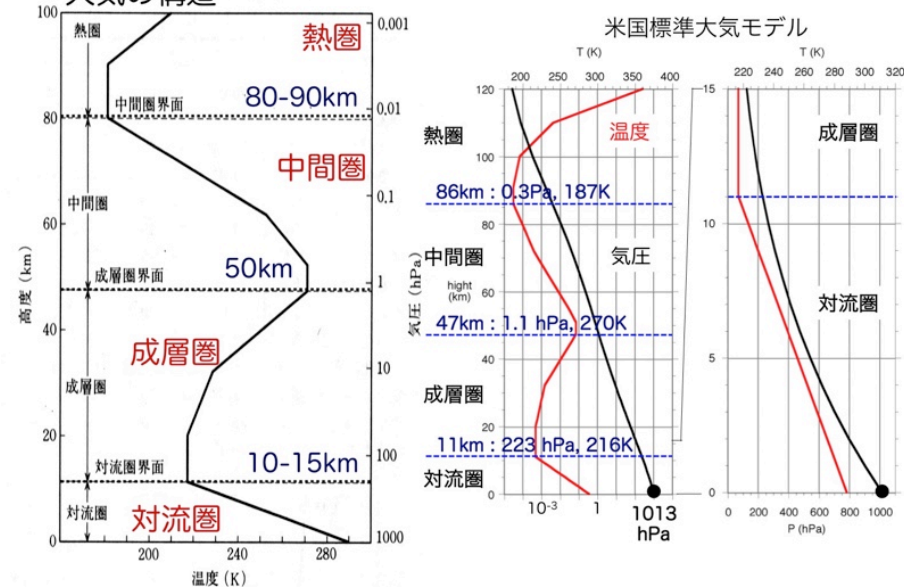


図 2.8 大気温度分布(米国標準大気, 1976)と大気層の区分.

(岩波講座地球惑星科学 1, 1996)

大気の構造

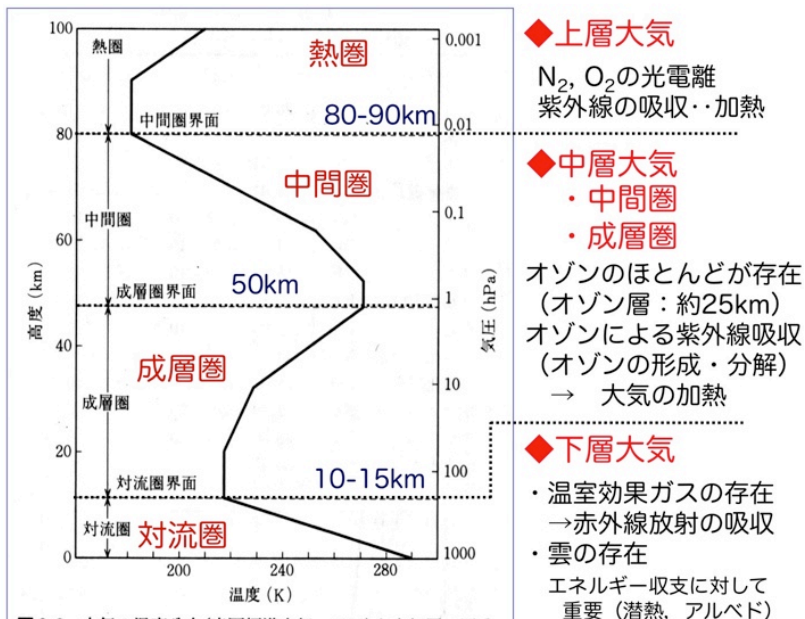
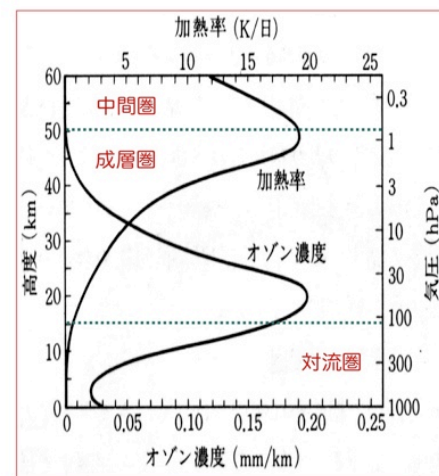


図 2.8 大気温度分布(米国標準大気, 1976)と大気層の区分.

(岩波講座地球惑星科学 1, 1996)

オゾン濃度とオゾンによる加熱率



(会田, 1982; 岩波講座地球惑星科学 2, 1996)

◆オゾンの形成

- ・O₂量・下層ほど多
- ・紫外線強度・上層ほど多
- ・介在分子量・下層ほど多

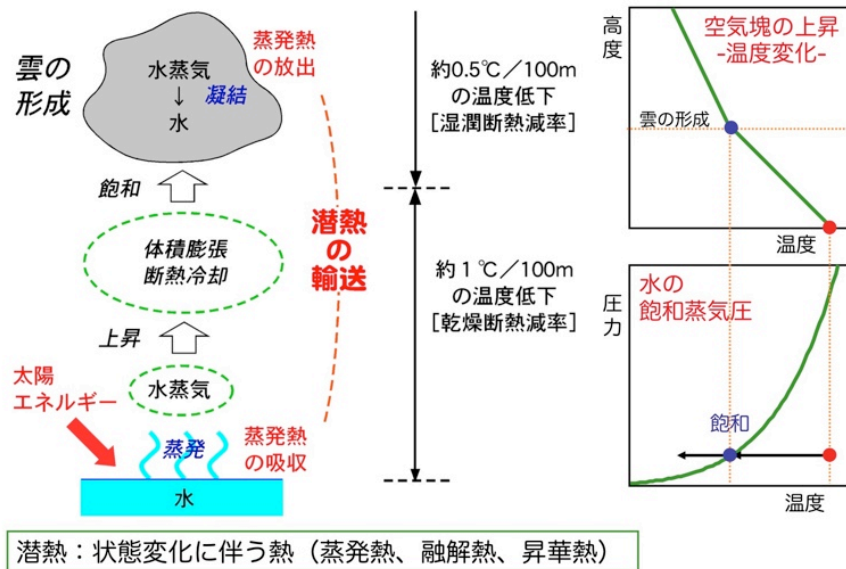
↓
オゾン量極大
約25km付近

◆オゾンの紫外線吸収による加熱

- ・紫外線強度・上層ほど強
- ・大気の熱容量・下層ほど大

↓
加熱率極大
約50km付近

◆雲の形成：潜熱輸送



雲の種類（10種雲形）

上層雲・・・5-13km

巻雲 Ci

巻積雲 Cs

巻層雲 Cc

中層雲・・・2-7km

高積雲 Ac

高層雲 As

上層まで広がる

乱層雲 Ns

上層・下層に広がる

下層雲・・・～2km

層積雲 Sc

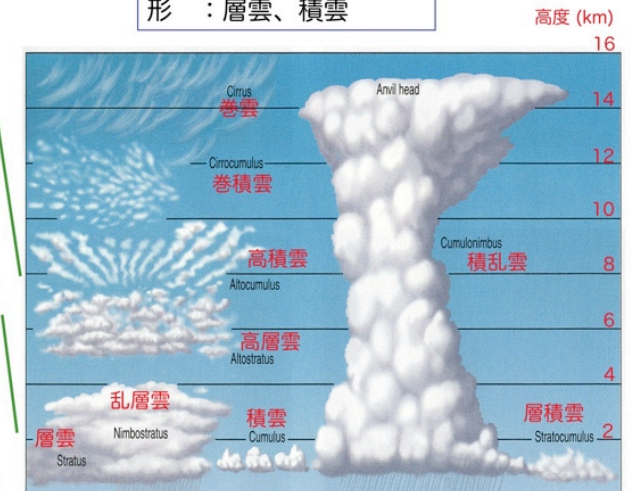
層雲 St

積雲 Cu

積乱雲 Cb

雲底は下層、雲頂は中層・上層に及び

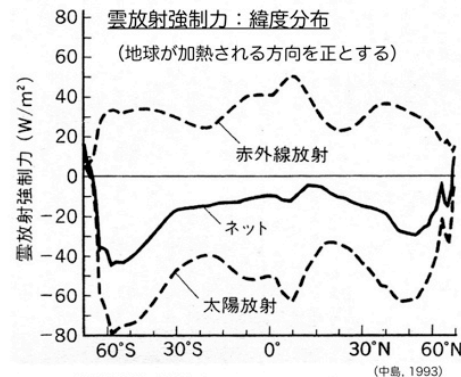
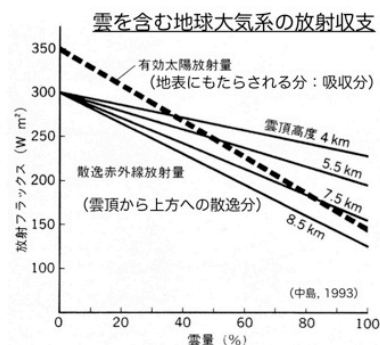
高さ：上層、中層、下層
形：層雲、積雲



(The Blue Planet, Skinner et al., 1999)

雲の効果

- ◆昼間：入射光を反射（寒い）・・・日傘効果
- ◆夜間：反射光を吸収（暖かい）・・・温室効果
- ◆アルベドを高める
雲がなければ、 $A=0.1$ ・・・日傘効果
[アルベド 海洋：0.06, 陸域：0.2; 面積比 海：陸 = 7：3]
- ◆上層の薄い雲（氷の結晶からなる。低温）
太陽放射は透過、地表からの赤外線放射を吸収
自身の赤外線放射は少ない→温室効果に寄与
- ◆下層の厚い雲
太陽放射を反射
高温のため自身の赤外線放射が多い
→ 温室効果への寄与は上層雲より少ない。
「日傘効果」



気候システムのフィードバックループ

(1) 水蒸気フィードバック



cf. 二酸化炭素
現在の2倍の量 → 地表温度1.2℃の上昇

(2) 雪・氷によるフィードバック



・・・長いタイムスケール。氷期-間氷期サイクルで重要

気候システムのフィードバックループ

(3) 赤外線放射-地表温度のフィードバック



(4) 雲アルベド・フィードバック



しかし・・・

- ・雲の種類により、太陽光の遮断、温室効果の度合は異なる。
- ・対流圏の雲の存在量は気候が変わっても大差ない(50%)。



気候システムのフィードバックループ

(5) その他

◎負の相互作用（カップリング）

◆火山活動による成層圏エアロゾル

太陽光の遮断効果・・・「日傘効果」

(例)

- ・ピナツボ火山の噴火
- ・“隕石の衝突”（白亜紀-第三紀境界：恐竜の絶滅）

◆人間活動による硫酸エアロゾル

→下層雲の形成・・・「日傘効果」

エアロゾル：大気中を浮遊する $0.001\sim10\mu\text{m}$ の微粒子

*硫黄酸化物 SO_x 、窒素酸化物 NO_x ：大気中で硫酸（ H_2SO_4 ）、硝酸（ HNO_3 ）となり、それが凝結してエアロゾルになる。

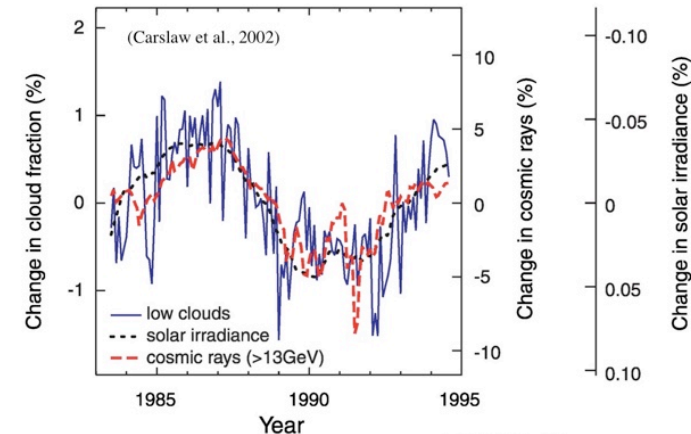
▶地表での太陽光の減少 → 地表温度の低下

▶雲の凝結核 → 下層雲の形成

▷酸性雨の原因

惑星アルベド：雲量

太陽放射量，下層雲の雲量，銀河宇宙線の変動の相関性



銀河宇宙線

- ・雲形成（凝結核の生成）
- ・太陽磁場による侵入の遮蔽

太陽活動 弱

- 太陽地場による宇宙線の遮蔽効果 弱
- 雲量 増加
- 気温 下降